

OPTICAL MODULATOR

Publication number: JP10010480 (A)

Publication date: 1998-01-16

Inventor(s): KAWAMURA HIROSHI; INAGAKI KEIZO; IMAI NOBUAKI +

Applicant(s): ATR KANKYO TEKIOU TSUSHIN KENK +

Classification:

- international: G02F1/035; H04B10/04; H04B10/06; H04B10/142; H04B10/152;
G02F1/01; H04B10/04; H04B10/06; H04B10/142; H04B10/152;
(IPC1-7): G02F1/035; H04B10/04; H04B10/06; H04B10/142;
H04B10/152

Also published as:

JP2824420 (B2)

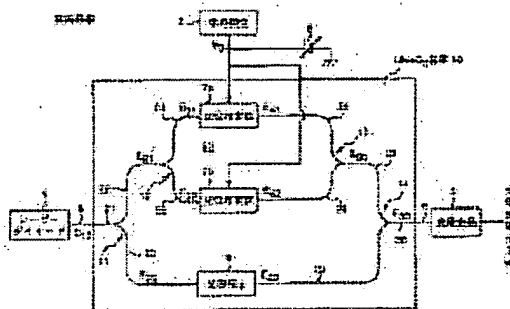
European:

Application number: JP19960164475 19960625

Priority number(s): JP19960164475 19960625

Abstract of JP 10010480 (A)

PROBLEM TO BE SOLVED: To remove ternary modulation distortions with a simple device constitution by further demultiplexing one demultiplexed signal, subjecting these signals to optical phase modulation in antiphases from each other, then demultiplexing the signals, multiplexing this light signal and the other light signal subjected to phase shift in the antiphases and setting a demultiplexing ratio, modulation index, and bias phase in such a manner that the ternary intermodulation distortions are removed. **SOLUTION:** An optical demultiplexer 11 demultiplexes the inputted light signal to two signals which a prescribed demultiplexing ratio, outputs the one light signal to an optical demultiplexer 12 and outputs the other light signal via a phase shifter 9 to an optical multiplexer 14. The optical demultiplexer 12 demultiplexes the one light signal to two signals at 1:1 and outputs the light signals in the antiphase from each other to two phase modulators 7a, 7b which execute optical phase modulation. These modulators execute the phase modulation at the prescribed modulation index and prescribed bias phase according to the inputted electric signals and multiplex the signals by an optical multiplexer 13. The one light signal subjected to the optical phase modulation and the other light signal subjected to the phase shift are multiplexed by the optical multiplexer 14. The demultiplexing ratio, the modulation index and the bias phase are so adjusted and set that the ternary intermodulation distortions of the light signals outputted from the optical demultiplexer 4 are substantially removed.



Data supplied from the *espacenet* database — Worldwide

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平10-10480

(43) 公開日 平成10年(1998) 1月16日

(51) Int.Cl. ⁶	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 2 F	1/035		G 0 2 F	1/035
H 0 4 B	10/152		H 0 4 B	9/00
	10/142			L
	10/04			
	10/06			

審査請求 有 請求項の数 2 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願平8-164475

(22) 出願日 平成 8 年(1996) 6 月25 日

(71) 出願人 396011680

株式会社エイ・ティ・アール環境適応通信
研究所

京都府相楽郡精華町大字乾谷小字三平谷 5
番地

(72) 発明者 川村 博史

京都府相楽郡精華町大字乾谷小字三平谷 5
番地 株式会社エイ・ティ・アール環境適
応通信研究所内

(74) 代理人 弁理士 青山 葆 (外 2 名)

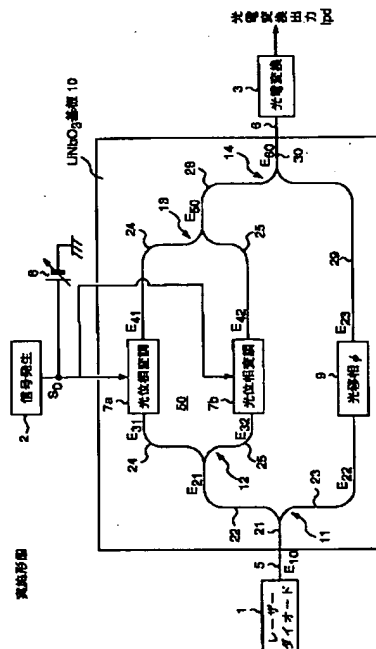
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光変調装置

(57) 【要約】

【課題】 装置構成が簡単であって、3次相互変調歪成分を実質的に除去することができる光変調装置を提供する。

【解決手段】 入力される光信号を所定の分波比で2分波して第1と第2の光信号とし、第1の光信号を分波比1で2分波して第3と第4の光信号とする。プッシュ・プル型位相変調器は、第3の光信号を入力される電気信号に従って所定の位相変調指数及び所定のバイアス位相で光位相変調を行って出力するとともに、第4の光信号を上記入力される電気信号に従って上記位相変調指数及び上記バイアス位相でかつ上記光位相変調と逆相で光位相変調を行って出力し、これら2つの光信号を合波して出力して第5の光信号とする。さらに、第2の光信号と、第5の光信号とを逆相で合波して出力して第6の光信号とする。分波比と変調指数とバイアス位相とは第6の光信号における3次相互変調歪が実質的に除去されるように調整されて設定される。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 入力される光信号を所定の分波比で2分波する第1の光分波手段と、
 上記第1の光分波手段から出力される一方の光信号を分波比1で2分波する第2の光分波手段と、
 上記第2の光分波手段から出力される一方の光信号を、入力される電気信号に従って所定の位相変調指数及び所定のバイアス位相で光位相変調を行って出力するとともに、上記第2の光分波手段から出力される他方の光信号を、上記入力される電気信号に従って上記位相変調指数及び上記バイアス位相でかつ上記光位相変調と逆相で光位相変調を行って出力する光位相変調手段と、
 上記光位相変調手段から出力される2つの光信号を合波して出力する第1の光合波手段と、
 上記第1の光分波手段から出力される他方の光信号を所定の移相値だけ移相する光移相手段と、
 上記第1の光合波手段から出力される光信号と、上記光移相手段から出力される光信号とを合波して出力する第2の光合波手段とを備え、
 上記光移相手段の移相値は、上記第2の光合波手段において、上記第1の光合波手段から出力される光信号と、上記光移相手段から出力される光信号とが逆相で合波されるような値に設定され、
 上記分波比と、上記変調指数と、上記バイアス位相とは、上記第2の光合波手段から出力される光信号の3次相互変調歪が実質的に除去されるように調整されて設定されることを特徴とする光変調装置。

【請求項2】 入力される光信号を所定の分波比で2分波する第1の光分波手段と、
 上記第1の光分波手段から出力される一方の光信号を分波比1で2分波する第2の光分波手段と、
 上記第2の光分波手段から出力される一方の光信号を、入力される電気信号に従って所定の位相変調指数及び所定のバイアス位相で光位相変調を行って出力するとともに、上記第2の光分波手段から出力される他方の光信号を、上記入力される電気信号に従って上記位相変調指数及び上記バイアス位相でかつ上記光位相変調と逆相で光位相変調を行って出力する光位相変調手段と、
 上記光位相変調手段から出力される2つの光信号を合波して出力する第1の光合波手段と、
 上記第1の光合波手段から出力される光信号と、上記第1の光分波手段から出力される他方の光信号とを合波して出力する第2の光合波手段とを備え、
 上記第2の光合波手段において、上記第1の光合波手段から出力される光信号と、上記光移相手段から出力される光信号とが逆相で合波されるように設定され、
 上記分波比と、上記変調指数と、上記バイアス位相とは、上記第2の光合波手段から出力される光信号の3次相互変調歪が実質的に除去されるように調整されて設定されることを特徴とする光変調装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、マッハ・ツェンダ(Mach-Zehnder)型光変調装置に関する。

【0002】

【従来の技術】 近年CATVなどに代表される光ファイバを用いたサブキャリア伝送の研究が盛んになってきた。現状の変調周波数は1GHz程度と低いのが、将来は高速伝送や大容量伝送などを実現するためにミリ波などの高い変調周波数が用いられると考えられる。このような高い周波数ではLiNbO₃基板を用いたマッハ・ツェンダ型外部光変調器(MZ-EOM)を用いて光変調を行う。サブキャリア伝送で多チャンネルの信号伝送を行う場合には、3次相互変調歪(以下、IM₃という。)により発生する信号成分がチャンネル帯域内に入るため、伝送路でのIM₃成分の抑制が極めて重要である。従って、光ファイバケーブルを用いたサブキャリア伝送では、光変調器の歪を低減することが重要になる。マッハ・ツェンダ型外部光変調器は、変調特性がコサイン2乗特性なので、IM₃成分は詳細後述するように位相変調指数mにより一意的に決定され、位相変調指数が大きくなるとIM₃成分は大きくなる。一方で、受光器での受信信号強度は光信号の変調度の2乗に比例するため、受信信号強度を大きくするためには、位相変調指数はあまり小さくすることができない。

【0003】 このような問題を解決するために次に示すいくつかの方法が提案されてきた。

(1) 増幅器の非線形性を補正するために行なわれている方法を用いて入力信号にプリディストーション(前置補償)を行う方法(以下、第1の方法という。)

(2) 2つの光変調器を並列に接続してIM₃成分をキャンセルする方法(例えば、従来技術文献1「J.J. Pan et al., "Ultra-linear electro-optic modulators for microwave fiber optic communications", Proceedings of SPIE, Optical Technology for Microwave Applications V, Vol. 1476, pp. 32-43, 1991年」参照。)(以下、第2の方法という。)

(3) 2つの光変調器を直列に接続してIM₃成分をキャンセルする方法(例えば、従来技術文献2「H. Skeie et al., "Linearization of Electro-optic Modulators by a Cascade Coupling of Phase Modulating Electrodes", Proceedings of SPIE, Integrated Optical Circuits, Vol. 1583, pp. 153-164, 1991年」参照。)(以下、第3の方法という。)

【0004】 図2は、従来例のマッハ・ツェンダ型光変調装置の平面図及びブロック図である。図2において、電気光学効果を有するLiNbO₃基板10上に、光導波路21、22、23、30と、光導波路を用いて構成された光分波器11と光合波器14と、光位相変調器7とが形成される。ここで、光位相変調器7は、公知の光

位相変調器であって、光導波路22を、例えばコプレーナ線路の中心導体と接地導体である2つの電極で挟設して構成され、2つの電極間に印加する電界を変化することにより、当該光導波路22を進行する光信号に対して位相変調を行う。この従来例では、信号発生器2によって発生される変調信号である電気信号 $S_0 = \sin \omega_a t$ に、可変直流電圧源8によって発生された直流バイアス電圧を重畳させた信号に比例する位相偏移 $p = m \sin \omega_a t + p_{bias}$ に従って光信号を位相変調する。ここで、 p_{bias} は直流バイアス電圧によって定まるバイアス位相である。以下、本明細書において、光信号に対して付したEという符号はその電界値を示す。

【0005】レーザダイオード1は所定の波長の無変調光信号 $E_{10} = \exp(j\omega t)$ （ここで、電界の振幅を1としている。）を発生して、光ファイバケーブル5及び光導波路21を介して光分波器11に入力される。光分波器11は入力された光信号を分波比1:1で2分波して、一方の光信号 $E_{21} = \{1/\sqrt{2}\} \cdot \exp(j\omega t)$ を光導波路22を介して光位相変調器7に出力する一方、他方の光信号 $E_{22} = \{1/\sqrt{2}\} \cdot \exp(j\omega t)$ を光導波路23を介して光合波器14に出力する。光位相変調器7は、入力される光信号 E_{21} を、電気信号 $S_0 = \sin \omega_a t$ に、可変直流電圧源8によって発生された直流バイアス電圧を重畳させた信号に従って所定の位相偏移 p で位相変調して、位相変調後の光信号 $E_{40} = \{1/\sqrt{2}\} \cdot \exp\{j(\omega t + p)\}$ を光導波路22を介して光合波器14に出力する。さらに、光合波器14は入力された2つの光信号 E_{22} 、 E_{40} を同相で合波して、同相合波後の光信号 $E_{60} = E_{NZ-EON} = \cos(p/2) \exp\{j(\omega t + p/2)\}$ を光導波路30及び光ファイバケーブル6を介して、例えばフォトダイオードである光電変換器3に出力する。光電変換器3は入力される光信号を光電変換して電気信号である光電変換出力信号 $I_{pd} = E_{NZ-EON} \cdot E_{NZ-EON}^*$ を出力する。ここで、 E_{NZ-EON}^* は光信号の電界 E_{NZ-EON} の複素共役である。

【0006】以下、当該光変調装置から出力される光信号 $E_{60} = E_{NZ-EON}$ の各次数の信号成分を計算する。なお、光信号の電界 $E_{60} = E_{NZ-EON}$ の2乗が光強度となる。当該計算は、実施の形態の最後の部分に、〈電界 E_{NZ-EON} の式の展開〉の項として示す。

【0007】 IM_3 成分は、増幅器のように伝達関数が x のべき乗の多項式で表される場合には、3次高調波成分と IM_3 成分はともに3次の項により生じ、 IM_3 成分は3次高調波成分の3倍の強度を持つ。しかしながら、従来例のマッハ・ツェンダ型光変調装置では、伝達関数がベッセル関数となるため、3次高調波の強度と IM_3 の強度が単純な比例関係は成立しない。そのため、位相偏移 $p = m(\sin \omega_{a1} t + \sin \omega_{a2} t + p_{bias})$ のように、周波数 f_1 、 f_2 ($f_1 = \omega_1/2\pi$ 、 $f_2 = \omega_2/$

2π)を有する2つの信号を変調信号として入力して、先に示した式を展開する必要がある（ここで、 m は位相変調指数である。）。ここで、展開の部分は省略して、光信号の無変調成分 P_{optDC} と、光信号の基本信号成分 P_{opt1st} と、周波数 $(2f_1 - f_2)$ を有する光信号の IM_3 信号成分 P_{opt1-2} との結果だけを以下に示す。詳細計算は、実施の形態の最後の部分に、〈電界 E_{NZ-EON} の式の展開〉の項として示す。

【0008】

【数1】光信号の無変調成分

$$P_{optDC} = 1 + \cos(p_{bias}) \cdot J_0(m)^2$$

【数2】光信号の基本信号成分

$$P_{opt1st} = 2 \sin(p_{bias}) \cdot J_0(m) \cdot J_1(m)$$

【数3】光信号の IM_3 信号成分

$$P_{opt2-1} = 2 \sin(p_{bias}) \cdot J_2(m) \cdot J_1(m)$$

【0009】ここで、 $J_n(\cdot)$ は n 次のベッセル関数である。この結果より、基本波成分と、周波数 $(2f_1 - f_2)$ を有する IM_3 信号成分の比は、 $J_0(m)/J_2(m)$ となり、バイアス位相 p_{bias} によらず、光位相変調器7の位相変調指数 m のみにより一意に決定される。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】上記第1の方法を用いた装置は既に商品化もされているが、ダイオードなどの非線形素子を用いた回路によりアリディストーションを発生させるため、動作周波数に応じて各種パラメータの最適化が不可欠であり、また、ミリ波などの高い周波数では装置を実現することがやや困難である。さらに、第2及び第3の方法では、2つの変調器を接続することが必要で、高い変調周波数に対応するためには電極配置等に工夫が必要であり、また、ミリ波などの高い周波数では高周波信号の位相を正確に制御して分配することが困難であるなどの問題点がある。

【0011】図2に示した従来例のマッハ・ツェンダ型光変調装置では、上述のように、基本波成分と、周波数 $(2f_1 - f_2)$ を有する IM_3 信号成分の比は、光位相変調器7の位相変調指数 m のみにより一意に決定されるために、 IM_3 信号成分を除去することはできない。

【0012】本発明の目的は以上の問題点を解決し、装置構成が簡単であって、3次相互変調歪成分を実質的に除去することができる光変調装置を提供することにある。

【0013】

【課題を解決するための手段】本発明に係る請求項1記載の光変調装置は、入力される光信号を所定の分波比で2分波する第1の光分波手段と、上記第1の光分波手段から出力される一方の光信号を分波比1で2分波する第2の光分波手段と、上記第2の光分波手段から出力される一方の光信号を、入力される電気信号に従って所定の位相変調指数及び所定のバイアス位相で光位相変調を行

って出力するとともに、上記第2の光分波手段から出力される他方の光信号を、上記入力される電気信号に従って上記位相変調指数及び上記バイアス位相でかつ上記光位相変調と逆相で光位相変調を行って出力する光位相変調手段と、上記光位相変調手段から出力される2つの光信号を合波して出力する第1の光合波手段と、上記第1の光分波手段から出力される他方の光信号を所定の移相値だけ移相する光移相手段と、上記第1の光合波手段から出力される光信号と、上記光移相手段から出力される光信号とを合波して出力する第2の光合波手段とを備え、上記光移相手段の移相値は、上記第2の光合波手段において、上記第1の光合波手段から出力される光信号と、上記光移相手段から出力される光信号とが逆相で合波されるような値に設定され、上記分波比と、上記変調指数と、上記バイアス位相とは、上記第2の光合波手段から出力される光信号の3次相互変調歪が実質的に除去されるように調整されて設定されることを特徴とする。

【0014】また、本発明に係る請求項2記載の光変調装置は、入力される光信号を所定の分波比で2分波する第1の光分波手段と、上記第1の光分波手段から出力される一方の光信号を分波比1で2分波する第2の光分波手段と、上記第2の光分波手段から出力される一方の光信号を、入力される電気信号に従って所定の位相変調指数及び所定のバイアス位相で光位相変調を行って出力するとともに、上記第2の光分波手段から出力される他方の光信号を、上記入力される電気信号に従って上記位相変調指数及び上記バイアス位相でかつ上記光位相変調と逆相で光位相変調を行って出力する光位相変調手段と、上記光位相変調手段から出力される2つの光信号を合波して出力する第1の光合波手段と、上記第1の光合波手段から出力される光信号と、上記第1の光分波手段から出力される他方の光信号とを合波して出力する第2の光合波手段とを備え、上記第2の光合波手段において、上記第1の光合波手段から出力される光信号と、上記光移相手段から出力される光信号とが逆相で合波されるように設定され、上記分波比と、上記変調指数と、上記バイアス位相とは、上記第2の光合波手段から出力される光信号の3次相互変調歪が実質的に除去されるように調整されて設定されることを特徴とする。

【0015】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照して本発明に係る実施形態について説明する。図1は、本発明に係る一実施形態であるマッハ・ツェンダ型光変調装置の平面図及びブロック図である。この実施形態の光変調装置は、図2の従来例と比較して、互いに逆相で光位相変調する2つの光位相変調器7a、7bを備えて図7に示すごとく構成されるプッシュ・プル型光位相変調器50を用いたことを特徴とする。

【0016】図1において、電気光学効果を有するLiNbO₃基板10上に、光導波路21、22、23、2

4、25、28、29、30と、光導波路を用いて構成された光分波器11、12と光合波器13、14と、光位相変調器7a、7bからなるプッシュ・プル型光位相変調器50とが形成される。ここで、光導波路21、22、23、24、25、28、29、30の形成は、LiNbO₃基板10上に公知の通りTiを熱拡散させることによりTi:LiNbO₃にてなる楕円断面形状の薄膜光導波路を形成することにより行われる。

【0017】図7は、光位相変調器7a、7bを備えて構成されるプッシュ・プル型光位相変調器50の構成を示す断面図である。図7において、LiNbO₃基板10上に互いに平行な2本の光導波路24、25が形成された後、中心導体とそれと所定の間隔だけそれぞれ離れてかつ互いに平行に形成された2つの接地導体42、43とを備えたコプレーナ線路40が形成される。ここで、光導波路24と25の間のLiNbO₃基板10上に、中心導体41が形成され、光導波路24の図上左側の外側のLiNbO₃基板10上に接地導体42が形成され、光導波路25の図上右側の外側のLiNbO₃基板10上に接地導体43が形成される。ここで、信号発生器2によって発生される変調信号である電気信号 $S_0 = \sin \omega_a t$ に、可変直流電圧源8aによって発生された直流バイアス電圧を重畳させた信号（以下、印加信号という。）が中心導体41と接地導体42、43間に印加され、当該印加信号によって、図7において矢印51、52で示すように、光導波路24、25に対して互いに逆相でかつ2分配されて電界が生じる。

【0018】従って、図1において、光位相変調器7aは、上記印加信号に比例する位相偏移 $p = m \sin \omega_a t + p_{bias}$ の1/2に従って光信号を位相変調する一方、光位相変調器7bは、上記印加信号の反転信号に比例する位相偏移 $-p = m \sin \omega_a t + p_{bias}$ の1/2に従って光信号を位相変調する。すなわち、光位相変調器7bは、光位相変調器7aとは逆相で位相変調する。ここで、光位相変調器7a、7bからなるプッシュ・プル型光位相変調器50において、可変直流電圧源8の直流バイアス電圧を変化することにより、バイアス位相 p_{bias} を変化することができる。

【0019】図1において、レーザダイオード1は所定の波長の無変調光信号 $E_{i0} = \exp(j\omega t)$ （ここで、電界の振幅を規格化して1としている。）を発生して、光ファイバケーブル5及び光導波路21を介して光分波器11に入力される。光分波器11は入力された光信号を電力分波比 $r : (1-r)$ （以下、当該光分波器11の電力分波比を r という。）（ここで、 $0 < r < 1$ である。）で2分波して、一方の光信号 $E_{21} = \sqrt{r} \exp(j\omega t)$ を光導波路22を介して光分波器12に出力する一方、他方の光信号 $E_{22} = \sqrt{1-r} \exp(j\omega t)$ を光導波路22、移相値 ϕ (rad)だけ移相する光移相器9、光導波路29

を介して光信号 $E_{23} = \{\sqrt{(1-r)}\} \cdot \exp(j\omega t + \phi)$ として光合波器14に出力する。一方、光分波器12は入力された光信号を電力分波比1:1で2分波して、一方の光信号 $E_{31} = \{\sqrt{(r/2)}\} \cdot \exp(j\omega t)$ を光導波路24を介して光位相変調器7aに出力するとともに、他方の光信号 $E_{32} = \{\sqrt{(r/2)}\} \cdot \exp(j\omega t)$ を光導波路25を介して光位相変調器7bに出力する。

【0020】光位相変調器7aは、入力される光信号 E_{31} を、電気信号 $S_0 = \sin \omega_a t$ に、可変直流電圧源8aによって発生された直流バイアス電圧を重畳させた信号に従って所定の位相偏移 $p/2$ で位相変調して、位相変調後の光信号 $E_{41} = \{\sqrt{(r/2)}\} \cdot \exp\{j(\omega t + p/2)\}$ を光導波路24を介して光合波器13に出力する。一方、光位相変調器7bは、入力される光信号 E_{32} を、電気信号 $S_0 = \sin \omega_a t$ の反転信号に、可変直流電圧源8bによって発生された直流バイアス電圧を重畳させた信号の反転信号に従って所定の位相偏移 $p/2$ で、光位相変調器7aと比較して逆相で位相変調して、位相変調後の光信号 $E_{42} = \{\sqrt{(r/2)}\} \cdot \exp\{j(\omega t - p/2)\}$ を光導波路25を介して光合波器13に出力する。次いで、光合波器13は入力された2つの光信号 E_{41} 、 E_{42} を同相で合波して、同相合波後の光信号 $E_{50} = E_{41} + E_{42} = \sqrt{(r)} \cos(p/2) \exp(j\omega t)$ を光導波路28を介して光合波器14に出力する。さらに、光合波器14は入力された2つの光信号 E_{50} 、 E_{23} を合波して、合波後の光信号 $E_{60} = (E_{50} + E_{23}) / \sqrt{(2)}$ を光導波路30及び光ファイバケーブル6を介して、例えばフォトダイオードで構成されて例えば2乗検波特性を有する光電変換器3に出力する。光電変換器3は入力される光信号を光電変換して電気信号である光電変換出力信号 $I_{pd} = E_{60} \cdot E_{60}^*$ を出力する。ここで、 E_{60}^* は光信号の電界 E_{60} の複素共役である。

【0021】以上の実施形態において、光分波器11の電力分波比 r は、予め決められて設定されるが、電力分波比 r を可変としてもよい。その場合、互いに平行配置された2本の光導波路を備え2本の光導波路を伝搬する2つの導波光の伝搬位相差 $\Delta\phi$ を変化することにより結合量を変化して電力分波比 r を変化することができる公知の光方向性結合器を用いることができる。

【0022】ところで、無線装置において、一般的な電界の振幅変調+整流検波の場合には、逆相の無変調波を加えることにより、図3に示すように、単純に変調信号

$$\begin{aligned} E_{MZ-EOM} &= (1/2) \{ \exp(j\omega t - p/2) + \exp(j\omega t + p/2) \} \\ &= \cos(p/2) \exp(j\omega t) \end{aligned}$$

【0026】数4から明らかなように、従来例とは異なり、変調信号により電界強度のみが変調され、位相変調は生じないことがわかる。当該光変調装置の出力、すな

わち光合波器14の出力 $E_{out} = E_{60}$ では、上記電界 E_{MZ-EOM} に逆相の光信号 E_{23} が加えられて合成する。ここで、光分波器11の電力分波比 r （又は光強度分波比）を

【0023】以上の実施形態において、光移相器9を用いて、光合波器14において、入力される2つの光信号 E_{50} 、 E_{23} が互いに逆相 $(\phi = \pi)$ で合波されるように光移相器9の移相値が設定されるが、本発明はこれに限らず、光移相器9を設けず、光導波路23と光導波路29とを直結し、光合波器14において、入力される2つの光信号 E_{50} 、 E_{23} が互いに逆相 $(\phi = \pi)$ で合波されるように、光導波路23と光導波路29又は光導波路28の線路長を調整して設定してもよい。また、上記逆相の合波又は逆相の合波のための線路調整に代えて、プッシュプル型光位相変調器50の2つの光位相変調器7a、7bに対して同相で直流バイアス電圧を印加することにより、プッシュプル型光位相変調器50の合波器13の出力位相を変化させて、光合波器14において、入力される2つの光信号 E_{50} 、 E_{23} が互いに逆相で合波させてもよい。

【0024】以下、以上のように構成された光変調装置について、光信号の電界の簡単計算より各周波数成分の信号強度の計算を行い、その結果を用いて、各パラメータを変化させた場合の相互変調歪、変調効率の計算を行うことにする。図2の従来例においては、2つの光導波路の一方のみに位相変調を行っている。この場合、上述のように、位相変調を行うことにより強度だけでなく位相も変調される。一方、本実施形態の光変調装置では、同相分波された2つの光信号 E_{31} 、 E_{32} に対して互いに逆相で位相変調を行って合波することにより、強度のみの変調となるように、上記プッシュプル型光位相変調器50を用いた。このプッシュプル型光位相変調装置50の出力部（すなわち、光合波器13の出力）での電界値 $E_{50} = E_{MZ-EOM}$ は、次式で表される。

【0025】

【数4】

わち光合波器14の出力 $E_{out} = E_{60}$ では、上記電界 E_{MZ-EOM} に逆相の光信号 E_{23} が加えられて合成する。ここで、光分波器11の電力分波比 r （又は光強度分波比）を

rとすると、電界 E_{out} は、次式で表される。

【数5】

【0027】

$$E_{out} = \sqrt{r} E_{nz-50M} + \sqrt{(1-r)} \exp(j(\omega t + \pi))$$

【0028】ここで、位相偏移 $p = m \sin \omega_a t + p$ 【0029】

biasとすると、電界 E_{out} とその複素共役の積である光強度（光電力） P_{opt} は、次式で表される。 【数6】

$$\begin{aligned} P_{opt} &= 1 - 2\sqrt{r(1-r)} \cos(p_{bias}/2) \cdot J_0(m/2) \\ &\quad + r \cdot \cos(p_{bias}) \cdot J_0(m) \\ &\quad - 4\sqrt{r(1-r)} \cos(p_{bias}/2) \sum_{n=1}^{\infty} \{J_{2n}(m/2) \cos(2n\omega t)\} \\ &\quad + 2r \cdot \cos(p_{bias}) \sum_{n=1}^{\infty} \{J_{2n}(m) \cos(2n\omega t)\} \\ &\quad + 4\sqrt{r(1-r)} \sin(p_{bias}/2) \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(m/2) \sin(2n+1)\omega t \\ &\quad - 2r \cdot \sin(p_{bias}) \sum_{n=0}^{\infty} \{J_{2n+1}(m) \sin(2n+1)\omega t\} \end{aligned}$$

【0030】 IM_3 成分の計算は従来例と同様に、2つの周波数 f_1, f_2 を有する変調信号を入力することを仮定し、位相偏移 $p = m(\sin \omega_{a1} t + \sin \omega_{a2} t + p_{bias})$ を代入して計算すると、光信号の無変調成分 P_{optDC} と、光信号の基本信号成分 P_{opt1st} と、周波数 $(2f_1 - f_2)$ を有する光信号の IM_3 信号成分 P_{opt1-2} は、次式のようにになる。

【0031】

【数7】 $P_{optDC} = 1 - 2\sqrt{r(1-r)} \cos(p_{bias}/2) \cdot J_0^2(m/2) + r \cdot \cos(p_{bias}) \cdot J_0^2(m)$

【数8】 $P_{opt1st} = 4\sqrt{2r(1-r)} \sin(p_{bias}/2) \cdot J_0(m/2) \cdot J_1(m/2) - 2r \cdot \sin(p_{bias}) \cdot J_0(m) \cdot J_1(m)$

【数9】 $P_{opt2-1} = 4\sqrt{2r(1-r)} \sin(p_{bias}/2) \cdot J_1(m/2) \cdot J_2(m/2) - 2r \sin(p_{bias}) \cdot J_1(m) \cdot J_2(m)$

【0032】上記数9で、 $P_{opt2-1} = 0$ を満たす光分波器11の電力分波比 r 、変調指数 m 及び位相バイアス p_{bias} を設定することにより、 IM_3 成分信号を除去することができる。

【0033】

【実施例】本発明者は、上記の式に基づいて、位相変調指数 m と、光分波器11の電力分波比 r と、バイアス位相 p_{bias} の3つを変数として、諸特性の計算を行った。以下その結果について説明する。

【0034】図4は、従来例($p_{bias} = \pi/2$)に対する実施形態における3次相互変調歪(IM_3)成分と基本波成分の比の改善度 $IPD1$ (dB)を、光分波器1

1の電力分波比 r とバイアス位相 p_{bias} をパラメータとして2次元の等高線図として示すグラフである。ここで、位相変調指数 $m = 0.3$ (rad)とした。図4から明らかなように、バイアス位相 p_{bias} と電力分波比 r の変数領域の中で、電力分波比 r が小さいか、バイアス位相 p_{bias} が π に近くて電力分波比 r が大きい領域において、帯状に IM_3 成分が除去されている領域が存在し、その付近では、40dB以上のかなり高い改善度が得られる。この領域では出力される光強度の絶対値は小さくなっているが、光強度の不足は光増幅器などにより容易に補うことができる。

【0035】図5は、従来例($p_{bias} = \pi/2$)に対する実施形態における光変調度の改善度 $IPD2$ (dB)を、光分波器11の電力分波比 r とバイアス位相 p_{bias} をパラメータとして2次元の等高線図として示すグラフである。ここで、光変調度MODは、位相変調指数とは異なり、光信号に含まれる基本波信号成分の割合を示す。ここで、光変調度MODの計算では位相変調指数 m を0.1(rad)とかなり小さな値で計算を行った。位相変調指数 m を変化させた場合には、グラフの形状はあまり変化しないが、位相変調指数 m が大きくなるに従って、光変調度MODの改善度は小さくなっていった。図5から明らかなように、電力分波比 r が大きく、バイアス位相 p_{bias} が π 付近で、6dB以上の光変調度MODの改善が見られた。この光変調度MODの6dBの改善量は、電気信号での搬送波電力対雑音電力比(C/N)に換算にすれば、12dBの改善量に相当する(なお、レーザの相対強度雑音(RIN)が一番大きな主要

な雑音成分のとき)。

【0036】図6は、実施形態の光変調度MOD(%)を、光分波器11の電力分波比 r とバイアス位相 p_{bias} をパラメータとして2次元の等高線図として示すグラフである。図6から明らかなように、位相変調指数 m としてはわずかに0.1radであるにもかかわらず、光変調度MODとしては10乃至50%と極めて高い値を得ることができる。これは、ミリ波など高出力高線形増幅器の製造が困難な周波数でも低い位相変調指数 m で高い光変調度を得ることができることを示している。単に変調効率を改善する方法としては、従来例においてバイアス位相 p_{bias} を大きくする方法が提案されている(例えば、従来技術文献3「M.L.Farwell, et al., "Increased Linear Dynamic Range by Low Biasing the Mach-Zehnder Modulator", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 5, No. 7, pp. 779-782, 1993年」参照。)。しかしながら、この方法では IM_3 成分が発生するのに対して、本実施形態の光変調装置では高効率変調のできる領域においても、 IM_3 成分が実質的に除去できる領域が存在し、図6に示すように、基本波成分/ IM_3 成分 >80 dBc(キャリア信号比)の領域を容易に達成できる。

【0037】なお、本実施形態の光変調装置においては、従来例(バイアス位相 $p_{bias} = \pi/2$)において見られない2次相互変調歪 IM_2 が発生し、ここで、最も強度が高いのは、周波数($f_1 + f_2$)成分である。本発明者の計算(図示せず。)によれば、バイアス位相 $p_{bias} = \pi/2$ のとき、2次相互変調歪 IM_2 成分は最小となる。また、電力分波比 r が小さくなるにつれて、 IM_2 成分の強度が弱い領域が広がっている。なお、ミリ波帯でのサブキャリア伝送のように、1オクターブ以下の伝送帯域であれば、 IM_2 成分を無視することができると思われる。

$$\begin{aligned} \text{電界 } E_{MZ-EOM} \\ &= (1/2) \{ \exp(j\omega t) + \exp(j(\omega t + p)) \} \\ &= \cos(p/2) \cdot \exp\{j(\omega t + p/2)\} \end{aligned}$$

【0042】上記数10より電界は変調信号により強度だけでなく位相も変調されていることがわかる。光強度 P_{opt} は電界 E_{MZ-EOM} とその複素共役 E_{MZ-EOM}^* の積となり、次式で表される。

【0043】

【数11】

$$\begin{aligned} P_{opt} &= E_{MZ-EOM} \cdot E_{MZ-EOM}^* \\ &= \cos^2(p/2) \\ &= (1/2)(1 + \cos p) \\ &= (1/2) \{ 1 + \cos(p_{bias}) \cdot \cos(m \cdot \sin \omega_a t) \\ &\quad - \sin(p_{bias}) \cdot \sin(m \cdot \sin \omega_a t) \} \end{aligned}$$

【0046】さらに、次式を用いて展開する。

【0047】

【0038】以上説明したように、光位相変調器7a, 7bからなるプッシュ・プル型光位相変調器50にバイパス用光導波路23, 29を付加した導波路付加型光変調装置の構成及びその動作について種々の計算を行った。その結果、従来例に比較して簡単な構成で IM_3 成分を実質的に除去できることが計算により示された。また、低い高周波入力電力でも(すなわち、位相変調指数 m が小さくても)高い光変調度を得ることができ、従って、従来例に比較して線形性と変調効率を大幅に改善することができる。これにより、従来必要であった高出力高線形の増幅器が不要となり、当該光変調装置は、ミリ波などの高い周波数を用いたサブキャリア伝送に極めて有効であるという利点がある。

【0039】以上の実施形態において、光位相変調器7a, 7bからなるプッシュ・プル型光位相変調器50を用いているが、本発明はこれに限らず、公知の2つの光位相変調器7を備え、一方の光位相変調器7に対して信号 S_0 に直流バイアス電圧を重畳させた電圧信号を印加する一方、他方の一方の光位相変調器7に対して信号 S_0 を反転増幅器で反転させた信号に直流バイアス電圧を重畳させた電圧信号を印加するように構成してもよい。

【0040】<電界 E_{MZ-EOM} の式の展開>マッハ・ツェンダ型外部光変調装置から出力される電界 E_{MZ-EOM} の式の展開を以下に示す。分岐部では光強度が等分配されて $1/2$ となるので、電界は $1/\sqrt{2}$ となる。また、合波部では導波路に結合する同相モードと導波路に結合しない異相モードの2つが存在し、等強度分配されるため電界としては $1/\sqrt{2}$ となるため、最終的に合波された電界 E_{MZ-EOM} は、次式で表される。

【0041】

【数10】

$$\begin{aligned} &= \cos^2(p/2) \\ &= (1/2)(1 + \cos p) \end{aligned}$$

【0044】ここで、位相偏移 $p = m \sin \omega_a t + p_{bias}$ (ここで、 m は位相変調指数である。)として、式を変形すると、次式を得る。

【0045】

【数12】

【数13】

$$\begin{aligned} & \cos(m \cdot \sin \omega t) \\ &= J_0(m) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \{J_{2n}(m) \cdot \cos(2n\omega t)\} \end{aligned}$$

【数14】

$$\begin{aligned} & \sin(m \cdot \sin \omega t) \\ &= 2 \sum_{n=0}^{\infty} \{J_{2n+1}(m) \cdot \sin(2n+1)\omega t\} \end{aligned}$$

【0048】ここで、 $J_n(\cdot)$ は n 次のベッセル関数である。上記数12の光強度 P_{opt} を上記数13及び数14を用いて展開すると、次式のようになる。

$$P_{opt}$$

$$\begin{aligned} &= (1/2) [1 + \cos(p_{bias}) \cdot \{J_0(m) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \{J_{2n}(m) \cdot \cos(2n\omega t)\} \\ &\quad - \sin(p_{bias}) \cdot 2 \sum_{n=0}^{\infty} \{J_{2n+1}(m) \cdot \sin(2n+1)\omega t\}] \end{aligned}$$

【0050】数15から明らかなように、一般的に用いられるバイアス位相 $p_{bias} = \pi/2$ では偶数次の項が無くなり、奇数次項のみが残り、マッハ・ツェンダ型光変調装置でよく見られる数式となる。

【0051】

【発明の効果】以上詳述したように本発明に係る請求項1記載の光変調装置においては、入力される光信号を所定の分波比で2分波する第1の光分波手段と、上記第1の光分波手段から出力される一方の光信号を分波比1で2分波する第2の光分波手段と、上記第2の光分波手段から出力される一方の光信号を、入力される電気信号に従って所定の位相変調指数及び所定のバイアス位相で光位相変調を行って出力するとともに、上記第2の光分波手段から出力される他方の光信号を、上記入力される電気信号に従って上記位相変調指数及び上記バイアス位相でかつ上記光位相変調と逆相で光位相変調を行って出力する光位相変調手段と、上記光位相変調手段から出力される2つの光信号を合波して出力する第1の光合波手段と、上記第1の光分波手段から出力される他方の光信号を所定の移相値だけ移相する光移相手段と、上記第1の光合波手段から出力される光信号と、上記光移相手段から出力される光信号とを合波して出力する第2の光合波手段とを備え、上記光移相手段の移相値は、上記第2の光合波手段において、上記第1の光合波手段から出力される光信号と、上記光移相手段から出力される光信号とが逆相で合波されるような値に設定され、上記分波比と、上記変調指数と、上記バイアス位相とは、上記第2の光合波手段から出力される光信号の3次相互変調歪が実質的に除去されるように調整されて設定される。

【0052】従って、従来例に比較して簡単な構成で I_{M3} 成分を実質的に除去できることが計算により示され

【0049】
【数15】

た。また、低い高周波入力電力でも（すなわち、位相変調指数 m が小さくても）高い光変調度を得ることができ、従って、従来例に比較して線形性と変調効率を大幅に改善することができる。これにより、従来必要であった高出力高線形の増幅器が不要となり、当該光変調装置は、ミリ波などの高い周波数を用いたサブキャリア伝送に極めて有効であるという利点がある。

【0053】また、本発明に係る請求項2記載の光変調装置においては、入力される光信号を所定の分波比で2分波する第1の光分波手段と、上記第1の光分波手段から出力される一方の光信号を分波比1で2分波する第2の光分波手段と、上記第2の光分波手段から出力される一方の光信号を、入力される電気信号に従って所定の位相変調指数及び所定のバイアス位相で光位相変調を行って出力するとともに、上記第2の光分波手段から出力される他方の光信号を、上記入力される電気信号に従って上記位相変調指数及び上記バイアス位相でかつ上記光位相変調と逆相で光位相変調を行って出力する光位相変調手段と、上記光位相変調手段から出力される2つの光信号を合波して出力する第1の光合波手段と、上記第1の光合波手段から出力される光信号と、上記第1の光分波手段から出力される他方の光信号とを合波して出力する第2の光合波手段とを備え、上記第2の光合波手段において、上記第1の光合波手段から出力される光信号と、上記光移相手段から出力される光信号とが逆相で合波されるように設定され、上記分波比と、上記変調指数と、上記バイアス位相とは、上記第2の光合波手段から出力される光信号の3次相互変調歪が実質的に除去されるように調整されて設定される。

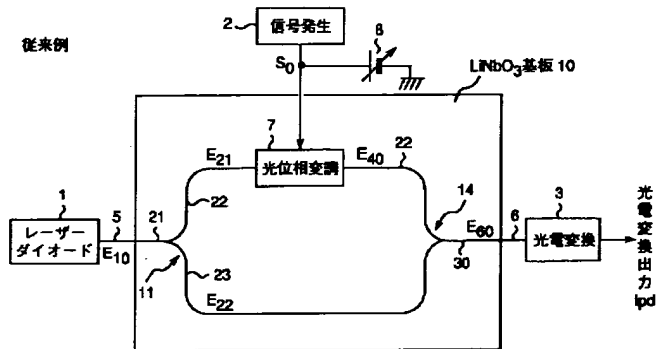
【0054】従って、従来例に比較して簡単な構成で I_{M3} 成分を実質的に除去できることが計算により示され

【図5】 従来例 ($p_{\text{bias}} = \pi/2$) に対する実施形態における光変調度の改善度 IPD2 (dB) を、光分波

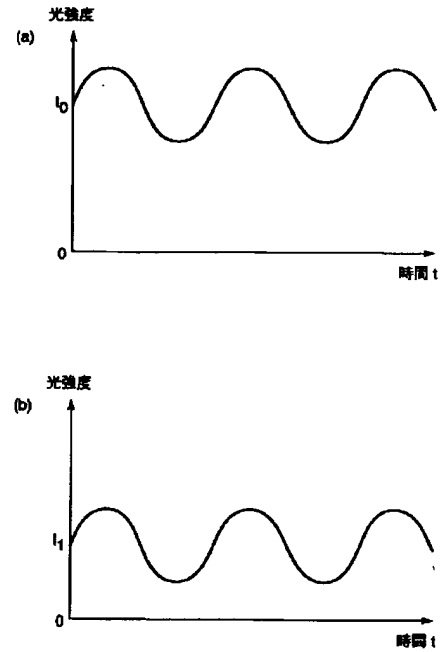
50…プッシュ・プル型光位相変調器。

[illegible]

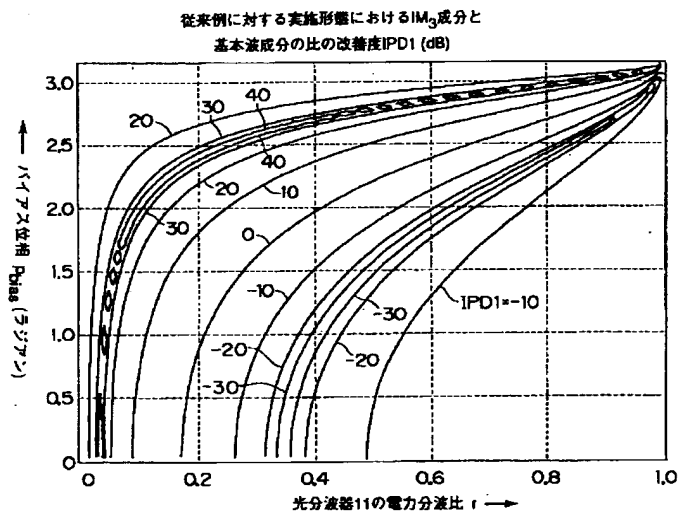
【図2】



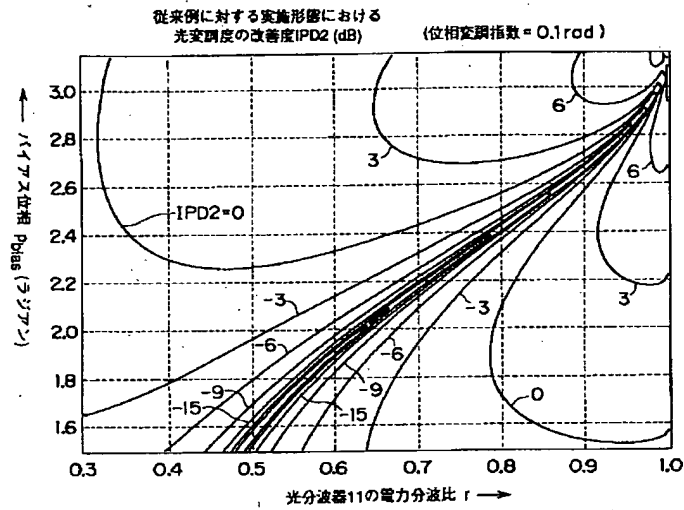
【図3】



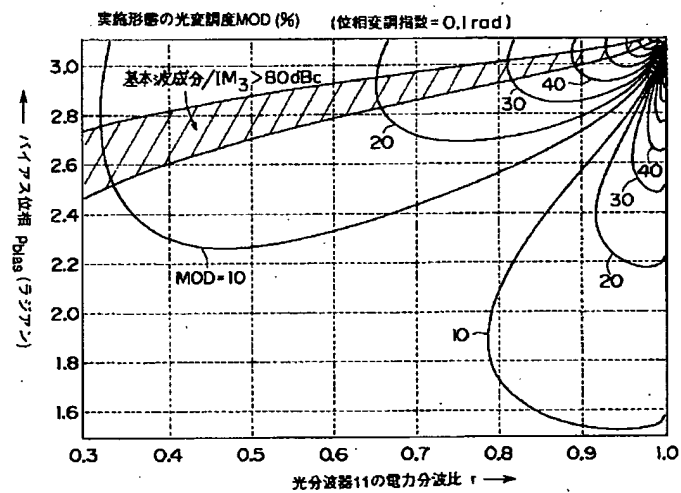
【図4】



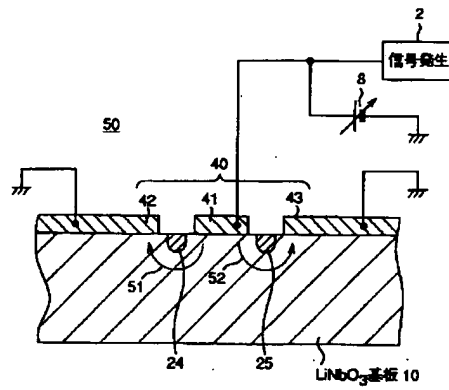
【図5】



【図6】



【図7】



フロントページの続き

(72)発明者 稲垣 恵三

京都府相楽郡精華町大字乾谷小字三平谷5
番地 株式会社エイ・ティ・アール環境適
応通信研究所内

(72)発明者 今井 伸明

京都府相楽郡精華町大字乾谷小字三平谷5
番地 株式会社エイ・ティ・アール環境適
応通信研究所内